



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Helena Leontjev

**EESTI RANNIKUÄÄRSETE LINNADE ÜLEUJUTUSALADE
KAARDISTAMINE KÕRGUSMUDELI ANDMETE ABIL**
MAPPING ESTONIAN COASTAL CITIES FLOOD AREAS,
BASED ON DIGITAL ELEVATION MODEL DATA

Bakalaureusetöö
Geodeesia ja maakorraldusõppekava

Juhendaja: dotsent Aive Liibusk, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Helena Leontjev		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Eesti rannikuäärsete linnade üleujutusala kaardistamine kõrgusmodeli andmete abil			
Lehekülgi: 42	Jooniseid: 21	Tabeleid: 2	Lisasid: 1
Õppetool: Geomaatika ETIS-e teadusvaldkond: 4.2. Maateadused CERCS-i kood: P515 Geodeesia Juhendaja: Dotsent Aive Liibusk, <i>PhD</i> Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2018			
<p>Globaalne kliima soojenemine on põhjustanud jääliustike sulamist. Nende sulamise tagajärjel tõuseb maailmamere veetase ning see põhjustab üleujutusi rannikualadel ning madalamates piirkondades. Üleujutuste modelleerimiseks on käesolevas töös kasutatud digitaalset kõrgusmodelit (DEM).</p> <p>Bakalaureustöö eesmärgiks oli hinnata erinevatest maatõusumudelitest (Est2016LU ja NKG2016LU_abs) pärinevate maatõusu kiiruste mõju suhtelise mereveetaseme tõusu arvutamisel ning kaardistada rannikuäärsete linnade (Haapsalu, Tallinn, Pärnu, Narva ja Kuressaare) üleujutusala 100 aasta pärast.</p> <p>Andmetöötlus on läbi viidud Quantum GIS programmis ning andmetöötluse alusmaterjalideks olid Maa-ametist tellitud kõrgusmodelid. Töödeldud kõrgusmodelitele lisati kolm erineva kõrgusega veetasest vastavalt arvutatud suhtelisele merevee taseme tõusule 10, 50 ja 100 aasta perspektiivis.</p> <p>Töö tulemustest selgub, et 100 aasta pärast puuduvad globaalsest veetaseme tõusust põhjustatud üleujutused Narvas. Kõige ulatuslikumad üleujutusala on Haapsalus ning Tallinnas. Pärnus ja Kuressaares on üleujutusala küllaltki väikesed. Hooneteni jõuab vesi vaid Haapsalus. Tallinnas ja Pärnus ujutab vesi osaliselt üle üldkasutatavad rannaäärsed alad. Enamuse kõikides linnades olevatest üleujutusala moodustavad madalad rannikuäärsed piirkonnad.</p>			
Märksõnad: Eesti rannikualade üleujutused, merevee taseme tõus, digitaalne kõrgusmodel, LIDAR			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Helena Leontjev		Speciality: Geodesy and Land Management	
Title: Mapping Estonian coastal cities flood areas, based on digital elevation model data			
Pages: 42	Figures: 21	Tables: 2	Appendixes: 1
Chair: Geomatics Field of research: 4.2. Earth sciences CERCS code: P515 Geodesy Supervisors: Associate Professor Aive Liibusk, <i>PhD</i> Place and date: Tartu, 2018			
<p>The global warming has caused melting of the glacier. Because of that, the world's sea level is rising and causes floodings in the coastal areas. In this study, we have used digital elevation model (DEM) for modeling the floods.</p> <p>The purpose of this bachelor thesis was to evaluate the impact of the land uplift rise from different land uplift models' (Est2016LU and NKG2016LU_abs) to calculate relative sea level rise and to map coastal cities' (Haapsalu, Tallinn, Pärnu, Narva, and Kuressaare) flood areas in 100 years.</p> <p>Data processing has been carried out with the program Quantum GIS and the base materials were elevation models from Maa-amet. Three different water level heights were added to the processed elevation models calculated according to the relative sea level rise in 10, 50 and 100 years perspective.</p> <p>From the results of the study, we can see that after 100 years there will be no floods, which are caused by the global sea level rise in Narva. Most extensive flood areas will be in Haapsalu and Tallinn. The flood areas in Pärnu and Kuressaare are quite small. The water level will reach buildings only in Haapsalu. In Tallinn and Pärnu, the water will partially flood over public coastal areas. Most of these flood areas are located at the low coastal areas.</p>			
Keywords: Estonian coastal areas floods, sea level rise, digital elevation model, LIDAR			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. TEOORIA	7
1.1. Globaalne veetaseme tõus ja selle määramine	7
1.2. Veetaseme muutused Läänemeres ja Eesti rannikualade üleujutused	8
1.3. Maapinna tõus Eestis	9
1.4. Kõrgusmudel ja selle loomiseks vajalike kõrgusandmete kogumine	11
1.5. LIDAR- tehnoloogia kasutamine kõrgusandmete kogumiseks ja Maa-ameti poolt teostatav aerolaserskaneerimine	12
2. ANDMED JA METOODIKA	14
2.1. Töös kasutatud kõrgusmudel	14
2.2. Metoodika ja andmetöötlus programmiga QGIS	15
3. TULEMUSED	23
3.1. Narva	23
3.2. Haapsalu	24
3.3. Pärnu	28
3.4. Kuressaare	30
3.5. Tallinn	33
KOKKUVÕTE	35
KASUTATUD KIRJANDUS	37
LISAD	39
Lisa 1. Maa-ametist ruumiandmete kasutamisoiguse saamise taotlus	40

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on aktuaalseks probleemiks globaalne kliima soojenemine, mis põhjustab Gröönimaa ja Antarktika liustike sulamist. Jääliustike sulamise tagajärjel on hakanud maailmamere veetase tõusma ning see omakorda võib tekitada üleujutusi rannikualadel ning madalamates piirkondades. Eesti rannikuäärset linnad on peamiselt mõjutatud läänekaarte tuultest, mis pressivad tormide ajal vett läbi Taani väinade ja põhjustavad sellega veetaseme tõusu Eesti rannikul. Selleks, et määrata veetaseme muutusi kasutatakse rannikualadel veemõõdujaamu ning avamerel satelliit altimeetriat.

Hoolimata sellest, et veetaset pidevalt mõõdetakse on jätkuvalt probleemiks üleujutused, mida ei osata ette näha. Üleujutuste modelleerimiseks on võimalik kasutada digitaalset kõrgusmodelit (DEM), mille põhjal saab prognoosida üleujutusi erinevates piirkondades. Digitaalse kõrgusmodeli saamiseks tuleb mõõdistada maapinna punkte, millele saadakse geograafilised koordinaadid. Koordinaadid saadakse kaugseires kasutusel oleva LIDAR seadmega.

Antud töös on kasutatud Maa-ametist saadud kõrgusmudeleid, mille põhjal on koostatud virtuaalne raster fail Quantum GIS programmis (edaspidi QGIS). Seejärel on raster faili värvitoone muudetud ning saadud värviline digitaalne kõrgusmodel. Koostatud mudelitele on lisatud erineva kõrgusega veetasemed. Veetasemed saadakse lahutades globaalsest maailmamere veetaseme tõusu kiirusest töös olevate linnade maapinna tõusu kiirus. Igas linnas saadud suhteline merevee taseme tõusu kiirus on läbi korrutatud arvuga, mitme aasta pärast soovitakse näha, millised alad ujutatakse üle vastavalt arvutatud veetaseme kiirusele.

Uurimistöö eesmärgiks on hinnata erinevatest maatõusumudelitest (Est2016LU ja NKG2016LU_abs) pärinevate maatõusu kiiruste mõju suhtelise mereveetaseme tõusu arvutamisel ning kaardistada rannikuäärsete linnade (Haapsalu, Tallinn, Pärnu, Narva ja Kuressaare) üleujutusala 100 aasta pärast.

Uurimistöö koosneb neljast osast. Esimeses peatükis antakse lühiülevaade globaalsest veetaseme tõusust ning selle muutuste määramise viisidest ning maatõusust Eestis. Juttu tuleb ka veetaseme tõusust Läänemeres ja Eesti rannikualade üleujutustest. Põhjalikult on

lahti seletatud, mis on LIDAR-tehnoloogia ja kõrgusmodel ning kuidas koguda kõrgusmodeli jaoks vajalikke andmeid. Lisaks on räägitud Maa-ameti poolt teostatavast aerolaserskaneerimisest.

Teises peatükis on esmalt kirjeldatud Maa-ametist tellitud kõrgusmodeli andmeid ning seejärel on lahti seletatud uurimismetoodika ning programmis Quantum GIS digitaalse värvilise kõrgusmodeli loomine ja sellele veetasemete lisamine. Kolmandas peatükis on välja toodud loodud kõrgusmodelid ja nende analüüs ning viimaks on tehtud järeldused ja kokkuvõte.

Autor tänab Maa-ametit, kust saadi vajalikud andmed bakalaureusetöö koostamiseks.

1. TEOORIA

1.1. Globaalne veetaseme tõus ja selle määramine

Kliimamuutuste tagajärjel on hakanud vesi soojenema, mis soojenedes paisub. Lisaks põhjustab globaalne soojenemine polaarjää ja liustike sulamist. Nende kahe muutuse tõttu merevee tase tõuseb. Ajutisi veetaseme tõuse põhjustavad looded ja tormituuled. Maailmamere taseme tõusust on eriti haavatavad tiheasustusega rannikualad ja madalad piirkonnad nt Haiti, Taiwan, India. Vaatlusandmete ja teadlaste prognooside põhjal kliima soojenemine ning merevee taseme tõus jätkuvad ning veetõusu kiirus isegi suureneb [14].

Veetase on teatud kohas mõõdetud veepinna taseme kõrgus kokkuleppelise nullpunkti suhtes. Kõige lihtsam ja vanem veetaseme määramise viis on veemõõdulatt, millelt saab visuaalselt võtta veetaseme lugemeid. Üldiselt piisab kahest kuni kolmest lugemist päevas, et leida keskmine veetaseme tendents [13]. Lisaks veemõõdulattidele on tänapäeval kasutusel erinevad automaatjaamad, mis registreerivad veetaseme muutusi automaatselt.

Kõige levinumad viisid veetaseme määramiseks ongi veemõõdujaamad ja satelliit altimeeter. Avamerel kasutatakse veetaseme määramiseks satelliitidel põhinevat kaugusemõõturit ehk altimeetrit. See seade mõõdab satelliidi ja veepinna vahelist kaugust. Altimeetri töö põhineb sellel, et see mõõdab aega, mis kulub radari impulsil liikumiseks satelliidi antennist kuni veepinnani ja tagasi. Täpset satelliidi asukohta teades saame teada veepinna absoluutse kõrguse. Veemõõdujaamade mõõtmistulemused võivad sisaldada maapinna tõusu komponenti. Teisalt on veemõõdujaamade eeliseks pikad aegread (üle saja aasta), aga satelliit altimeetria aegride pikkuseks on ca 25 aastat. Maailmamere veetaseme tõusu on uurinud mitmed uurimisgrupid ja teadusasutused. [1,3]

EEA (*European Environment Agency*) satelliitmõõtmiste põhjal tõuseb globaalne veetase umbes 3,2 mm/aastas [2]. NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) on veetaseme tõusu kiiruse arvutamiseks kasutanud Austraalia riikliku teadusagentuuri CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) ja Hawaii meretasemete keskuse ülikooli andmeid. Hawaii meretasemete keskuse andmed põhinevad omakorda

NOA (*National Ocean Service*) ja UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*) 373-l veemõõdujaama aegridadel. Kõikide andmete põhjal on NOAA märkinud maailmamere veetaseme tõusuks 3,4 mm/aastas. [14]

Nebraska-Lincoln Ülikool on oma uurimuses välja toonud, et ülemaailmsel veemõõdujaamade võrgul on saja aasta pikkuseid andmeid kohaliku suhtelise merepinna tõusu kohta, kuid satelliit altimeeter pakub laiemat ülevaadet merepinna kõrgusest, välja arvatud polaaralade kohta. Veemõõdujaamade andmete põhjal tõuseb maailmamere veetase kiirusega 3,0 mm/aastas, satelliit altimeetriaga saadud veetaseme tõusu kiirus $3,4 \pm 0,4$ mm/aastas. Kolme erineva allika põhjal võib öelda, et maailmamere veetaseme tõusu kiirus jääb vahemikku 3,0-3,4 mm/aastas. Oma töös kasutan arvutuste jaoks selle vahemiku keskmist meretaseme tõusu ehk 3,2 mm/aastas. [16]

1.2. Veetaseme muutused Läänemeres ja Eesti rannikualade üleujutused

Euroopa teadlased on uurinud ka ainult Läänemere veetaseme muutuseid. Veemõõdujaama andmete põhjal on Läänemere veetaseme tõusu kiiruseks 1,5 mm/aastas [7]. Satelliit altimeetriaga saadud tulemuste põhjal tõuseb veetase kiirusega $5,0 \pm 3,0$ mm/aastas [7]. Kahel erineval meetodil saadud suur kiiruste erinevus on tingitud erinevate lähtepindade kasutamisest. Nimelt määratakse satelliit altimeetriaga kiirused Maa masskeskme suhtes ning veemõõdujaamade andmetest saadud kiirused näitavad veetaseme suhtelist tõusu maapinna suhtes. Kui erinevate meetodite lähtepindadele tähelepanu ei pöörata, siis võib veetaseme tõusu kiirusi ka valesti interpreteerida.

Läänemeres on suurte ja lühiajaliste (mõni tund kuni mõni päev) veetaseme muutuste peamiseks mõjutajateks siiski tormituuled, mis pressivad läbi Taani väinade Läänemerre vett juurde ning kuhjavad seda Läänemere idakaldale (Balti riigid).

Järgnevalt on välja toodud 3 suuremat tormi, mis on leidnud aset Eestis viimase 50-ne aasta jooksul ning millega on kaasnenud märgatav veetaseme tõus. Selle sajandi suurimaks tormiks võib pidada 2005. aasta jaanuaritormi, mis põhjustas suuri kahjustusi ja rannikualade üleujutusi Põhja-Euroopas. Eesti rannikualadest said kõige rohkem kannatada Pärnumaa ja läänerannik. Pärnus tõusis vesi 273 cm üle Kroonlinna nulli ning ujutas üle suure ala

rannaäärsest piirkonnast ning kohati ulatus vesi kesklinnani välja. Läänemaal olid üle ujutatud Matsalu rannaäärsed teed ning Haapsalus olid vee all Holmi poolsaar, Paralepa rand ning promenaadi ümbrus. Väiksemad üleujutused oli ka Saaremaal, Narva-Jõesuus ja Tallinnas. [12]

Varasemast ajast tuleb ära mainida 1967. aasta oktoobritormi, mis põhjustas suuri üleujutusi Pärnus, Haapsalus ja Kuressaares. Nendes linnades tungis vesi nii tööstushoonetesse kui ka elumajadesse. Narva-Jõesuus purustas vesi osaliselt sadamachitisi. Pärnus tõusis vesi 253 cm üle Kroonlinna nulli. Kaks aastat hiljem toimus järgmine torm, mida nimetatakse 1969. aasta novembritormiks. Tormiga kaasnesid tugev tuul ja vihmasadu ning suurimad üleujutused oli saartel ja Pärnus [17]. Pärnus tõusis veetase 195 cm üle Kroonlinna nulli. Kõigi kolme tormi puhul oli veetaseme tõus kõige kõrgem Pärnus. [12]

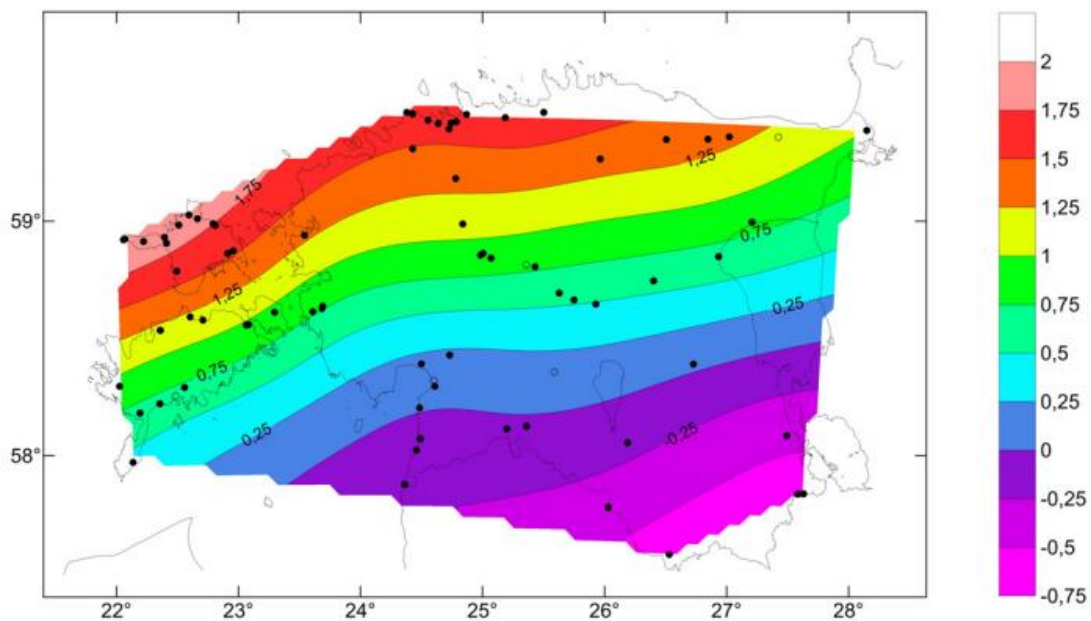
1.3. Maapinna tõus Eestis

Põhja-Euroopas ja Eestis on tuntud fenomeeniks maapinna tõus merepinna suhtes. Inimese eluea jooksul on isegi märgatud rannajoone muutumist. Maakoore liikumised võivad olla nii horisontaalsed, vertikaalsed kui ka kombineeritud deformatsioonid. Fennoskandias ja Põhja-Euroopas on maakoore tõus seotud Maa ülemiste kihtide vastujõuga viimase jääaja jäämasside koormusele, kuna need piirkonnad olid kaetud Skandinaavia jääkilbiga. Nüüd püüab Maa taastada pärast jää sulamist jääajaeelset tasakaaluasendit. Maakoore tõus on vahevöö ja maakoore reaktsioon sellele, kui jäämasside koormus taandus. [9,8]

Peamiselt on maapinna tõusu määramiseks kolm kõige enam kasutatavat meetodit: mere või järve veetaseme mõõtmised ehk okeanograafiline meetod, kõrgtäpsed kordusnivelleerimised ja tänapäeval on lisandunud GPS-püsijaamade andmed [8]. Nii nagu meretaseme tõusu kiiruste määramisel annavad erinevad meetodid erinevad kiiruste väärtused, nii saadakse ka maapinna tõusu kiirused kas suhtelised (nt kordusnivelleerimised) või absoluutsed (nt GPS-püsijaamad).

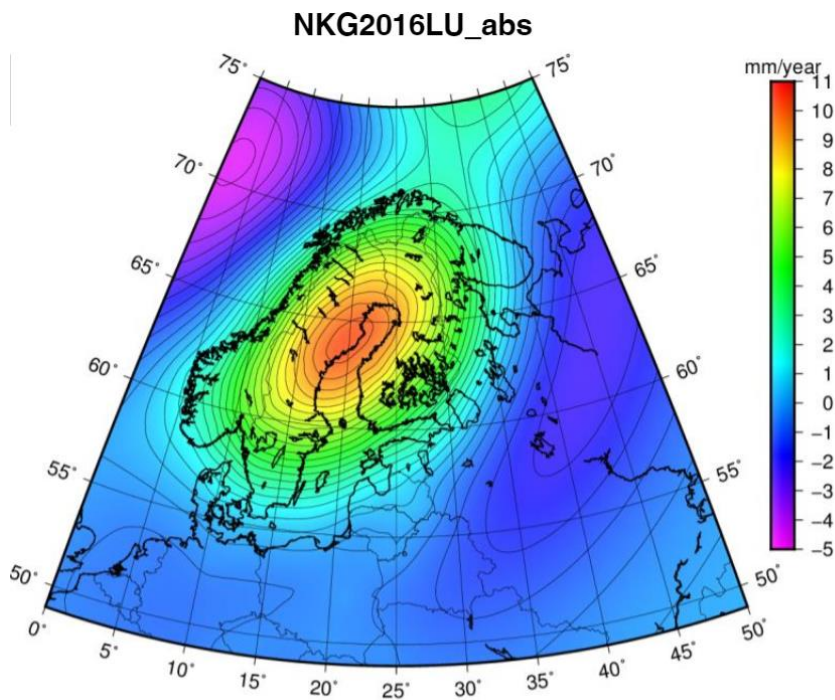
Viimase Eesti maatõusu mudeli Est2016LU koostas Tarmo Kall (Joonis 1), kes kasutas maapinna tõusu kiiruste arvutamiseks Eesti kõrgusvõrgu kõrgtäpse nivelleerimise I, II, III ja IV kordusnivelleerimise andmeid, mille tulemusena väljenduvad mudeli Est2016LU

kiirused suhtelist maapinna tõusu. Maapinna tõusu kiiruseks Eesti territooriumil on saadud -0,8...2,8 mm/aastas (Joonis 1). Viimastel aastakümnetel on maapinna tõusu kiirus vähenenud või jäänud isegi alla meretaseme tõusu kiirusele. [9]



Joonis 1. Eesti maapinna tõusu kiiruse mudel Est2016 LU [9].

Põhjamaade teadlased on kogu Skandinaavia kohta modelleerinud ka absoluutse maapinna tõusu mudeli NKG2016LU_abs (Joonis 2). See mudel on koostatud semi-empiriilise maatõusu mudeli NKG2016LU põhjal, milles on maapinna tõusu kiirused arvutatud GNSS-püsijaamade ja nivelleerimis andmete alusel. Mudelis NKG2016LU_abs on suhteline maapinna tõus määratud maa massikeskme suhtes. See saadakse, kui maapinna tõusule geoidi suhtes liidetakse geoidi pinna muutus. Mudelis NKG2016LU_abs on GNSS-püsijaamade absoluutne vertikaalliikumise kiirus mõõdetud koos mõõtemääramatusega globaalses referentsraamistikus ITRF2008. [18]



Joonis 2. Skandinaavia maapinna tõusu kiiruse model NKG2016LU_abs [18].

Jooniselt 2 on näha, et maapinna absoluutne tõus Eesti alal jääb vahemikku 0...4 mm/aastas. Kagu-Eestis on maapinna absoluutne tõus väiksem ning Loode-Eestis suurem.

1.4. Kõrgusmodel ja selle loomiseks vajalike kõrgusandmete kogumine

Digitaalne kõrgusmodel ehk DEM (*Digital Elevation Model*) on maapinna kujutis, mis koosneb kõrgusandmetest ning seda kasutatakse eelkõige reljeefianalüüsi läbiviimiseks ja visualiseerimiseks. Enamasti esitatakse DEM korrapärase võrgustikuna ehk rasterkujutisena. See tähendab, et kõrgusandmed on esitatud regulaarselt ruudukujuliste pikslite kaupa. Piksel on ruumi või pinna väikseim jagamatu ühik. Rasterkujutise iga piksel sisaldab numbrilist väärtust, mis väljendab ruuduga piiritletud maa-ala keskmist kõrgust. Maa-ala suurust, mille kohta kõrgusnumber on salvestatud nimetatakse lahutuseks. [10]

Kõrgusmodeli loomiseks on esmalt vaja mõõdistada maapinna punkte, mis omavad geograafilisi koordinaate ehk x- ja y- koordinaate ning kõrgust h. Antud väärtused saadakse tavaliselt kaugseires kasutusel oleva LIDAR seadmega lennukitelt või interferomeetriliste

radaritega satelliitidelt [19]. Õhust mõõdistatakse suur kogus maapinna punkte ehk saadakse punktipilv. Reljeefile iseloomulikes kohtades tuleb maapinna punkte mõõdistada tihedamalt võrreldes tasaste aladega. Andmete üleliigsus pole edasise töötamise jaoks hea.

LIDAR toorandmetest kõrgusmodeli saamiseks tuleb saadud punktipilv esmalt klassifitseerida. Klassifitseerimine toimub enamasti automaatselt aerolaserskaneerimise tulemusena. See tähendab, et iga seadme poolt salvestatud kõrguspunkt saab automaatselt väärtuse, mis näitab, kas tegemist on maapinna või mõne muu objektiga (nt veekogud, hooned). Klassifitseerimise käigus eemaldatakse „müra“ ja üldkattuvad alad. Klassifitseeritud kõrguspunktidest saab luua erineva lahutusega võrgustiktüüpi kõrgusmodeli. Sellise mudeli korral tekitatakse nendesse kohadesse, kus maapinna punkte on mõõdistatud liiga hõredalt või need puuduvad interpoleerimise teel puudu olevad kõrguspunktid. Interpoleerimine tähendab, et punktidele antakse väärtus teda ümbritsevate punktide väärtuste põhjal. Interpoleeritud kõrguspunktid on regulaarse sammuga ning seetõttu nimetatakse sellist mudelit ka kõrgusrastriks. [5]

1.5. LIDAR-tehnoloogia kasutamine kõrgusandmete kogumiseks ja Maa-ameti poolt teostatav aerolaserskaneerimine

LIDAR-i töö põhineb kolmemõõtmeliste koordinaatide arvutamisel tagasipeegeldunud laserimpulsidelt. LIDAR laserskaneerimise seade saadab välja valgusimpulsi, mis peale sihtkohta jõudmist peegeldub tagasi seadmesse. Valgusimpulsi kiir võib jaguneda mitmeks osaks, mille tõttu tekib tagasipeegeldusi mitmelt pinnalt. Laserpunkti peegelduse asukoht maapinnal on võimalik välja arvutada, kui teame täpselt lennuki hetkeasukohta, asendit, impulsi lähtenurka, impulsi kestust ja atmosfääri andmeid. Selleks, et teada lennuki täpset asukohta momendil, mil laserimpulss teele saadeti tuleb määrata skaneerimise ajal lennuki positsioon maapealse GPS-baasjaama suhtes kogu trajektoori vältel. [11]

Lennukitel peab olema laserskaneerimise seadme sensori asukoht väga täpselt määratud GPS-i ja inertsiaanduriga, et mõõta täpset pinna kõrgust. Aerolaserskaneerimise käigus saadud ruumilised koordinaadid koosnevad kolmest erinevast instrumendist: lennukil olevast inertsiaandurist, LIDAR sensorist ja GPS-st. Inertsiaandurist saadakse kiirendusvektorid ja kaldenurgad, LIDAR sensorist nurgad ja kaugused ning GPS-st

geodeetilised koordinaadid, mis on WGS84 süsteemis. Inertsiaanduri poolt registreeritud vigu, mis on tingitud lennuki kalletest saab parandada GPS-st saadud andmete põhjal. Korrigeeritud andmeid on võimalik konverteerida WGS84 ellipsoidi pinnal. WGS84 on ühtlasi rahvusvaheline geodeetiliste koordinaatide süsteem. Hoolimata kolmest erinevast komponendist, mis peaksid tagama võimalikult täpsed koordinaadid on skaneeritava lennukoridori äärealad alati ebatäpsemad kui keskmise osa andmed. [6]

Skaneerimise mõõdistustäpsus oleneb kõige rohkem lennukõrgusest. Lennukõrgusest sõltuvad nii horisontaalne kui ka vertikaalne täpsus. Skaneerimise tulemusena mõõdistatud kolmemõõtmeliste koordinaatide täpsust mõjutavad kõige enam järgmised tegurid: kauguse määramine, laserkiire positsioneerimine ja laserkiire suund. Kauguse määramise täpsust vähendavad optilised elemendid nt klaas ja peegel. Lisaks esitatakse saadud tulemused enamasti WGS84 koordinaatsüsteemis ning seetõttu sõltub lõpptulemus geoidimodeli täpsusest ning transformeerimisest kohalikku koordinaatsüsteemi. Võimalikult täpsete ruumiliste koordinaatide saamiseks tuleks mõõta kolme näitajat samal ajal: orientatsiooni, positsiooni ja kaugust, kuna nende mõõtmiste vaheline ajaline nihe põhjustab erinevaid vigu. Parimad ilmastikutingimused LIDAR mõõdistuse tegemiseks on jahe, kuiv ja puhas atmosfäär. LIDAR-ga saab mõõta detsimeetri täpsusega ruumilisi ja vertikaalseid DEM andmeid. [6]

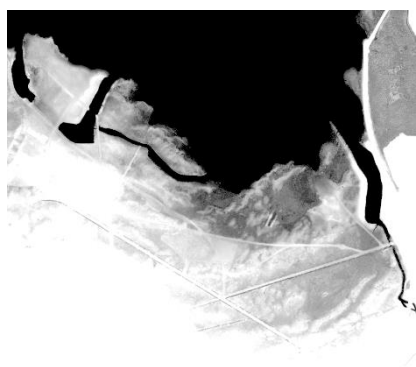
Esimene ring aerolaserskaneerimist Eestis teostati Maa-ameti poolt aastatel 2008-2011 koos aeropildistamisega. Teine ring teostati aastatel 2012-2015 ning 2012 aastal skaneeriti ka Kagu-Eesti piiriäärne ala, mis oli siiani veel skaneerimata. Mõõdistuste tegemiseks kuni aastani 2016 on kasutatud LIDAR seadet Leica AL50-II. Antud seadme eeldatav täpsus risti lennujoont on 0,05-0,33 meetrit, pikki lennujoont on 0,05-0,33 meetrit ning eeldatav kõrguse täpsus on 0,07-0,14 meetrit [15]. Alates aastast 2017 on mõõdistused teostatud uue aerolaserskanneriga RIEGL VQ-1560i, mis mitmekordistas punktitiheiduse. Antud seadmega planeeritakse Eestimaa üle mõõdistada aastate 2017-2020. [4]

Laserpunktide tihedus maapinnal sõltub mõõdistuslennu kõrgusest. Keskmise kõrguspunkti tihedus on 0,45 punkti ruutmeetri kohta, kui lennu kõrgus on 2400 meetrit ning 0,15, kui lennu kõrgus on 3000 meetrit. Madalama lennu korral on punktitiheidus suurem. Laserpunktide asukohad on arvutatud L-EST97 süsteemis ning punkti kõrgused on arvutatud BK77 süsteemi kasutades geoidi mudelit EST-GEOID2003 ning alates aastast 2018 mudelit EST-GEOID2017 ja kõrgussüsteemi EH2000. [4]

2. ANDMED JA METOODIKA

2.1. Töös kasutatud kõrgusmodel

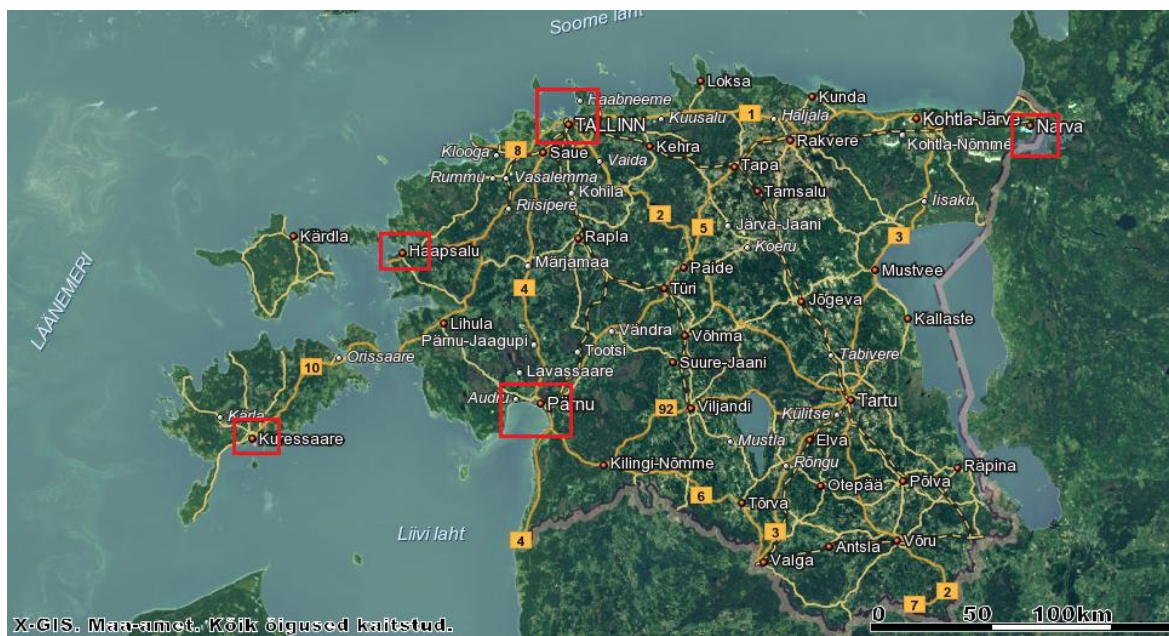
Alates 2008. aastast on Maa-amet teinud kaardistusotstarbel kõrgusandmete mõõdistusi lennukitelt 2400 meetri ja 1300-1500 meetri kõrguselt. Aastast 2016 on lennukõrgust tõstetud 2400 meetri pealt 3000 meetri peale seoses uue aerokaamera hankimisega, seetõttu on 2016 aasta punktihedus langenud. Madalama lennukõrguse korral on täpsus suurem ning kõrgema lennu korral väiksem. Mõõdistatud andmete põhjal on koostatud kõrgusmodelid. Maa-amet pakub tiheasulate kohta teostatud madallennu andmete alusel kõrgusmodelit lahutusega 1 meeter. 2400 meetri kõrgusel tehtud lennu andmete põhjal on võimalik saada kõrgusmudeleid, mille lahutus on 5 meetrit, 10 meetrit, 25 meetrit, 50 meetrit ja 100 meetrit. Suurema ja täpsema lahutusega mudelite alusel on loodud väiksema lahutusega mudelid. Mudelite failiformaatideks on 32-bit GeoTIFF ja XYZ formaat (Joonis 3). Viimane neist on sisuliselt ASCII tekstifail. [4,5]



X								
FILE HOME INSERT PAGE LAYOUT FORMULAS DATA REVIEW VIEW								
Clipboard			Font			Alignment		
J20								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	472000.5	6533000.5	15401					
2	472001.5	6533000.5	15766					
3	472002.5	6533000.5	15401					
4	472003.5	6533000.5	15036					
5	472004.5	6533000.5	43193					
6	472005.5	6533000.5	12114					
7	472006.5	6533000.5	43525					
8	472007.5	6533000.5	41699					
9	472008.5	6533000.5	43525					
10	472009.5	6533000.5	45717					
11	472010.5	6533000.5	46813					
12	472011.5	6533000.5	11383					
13	472012.5	6533000.5	43223					
14	472013.5	6533000.5	17593					
15	472014.5	6533000.5	17593					
16	472015.5	6533000.5	17593					
17	472016.5	6533000.5	16862					
18	472017.5	6533000.5	16132					
19	472018.5	6533000.5	15401					
20	472019.5	6533000.5	43193					
21	472020.5	6533000.5	12479					

Joonis 3. Näide GeoTiff failist ja XYZ failiformaadist.

Antud töös on kasutatud Maa-ametist tellitud ruumiandmeid. Ruumiandmete saamiseks Maa-ametist tuleb täita ruumiandmete kasutusõiguse saamise taotlus (vt Lisa 1). Taotlusesse tuleb märkida taotleja isikuandmed, andmete kasutamise eesmärk ning missuguseid andmeid soovitakse ja lisada tuleb ka kaardilehe numbrid soovitud andmete piirkonna kohta.



Joonis 4. Piirkonnad, mille kohta on Maa-ametist kõrgusmudeli jaoks andmed tellitud (Maa-amet).

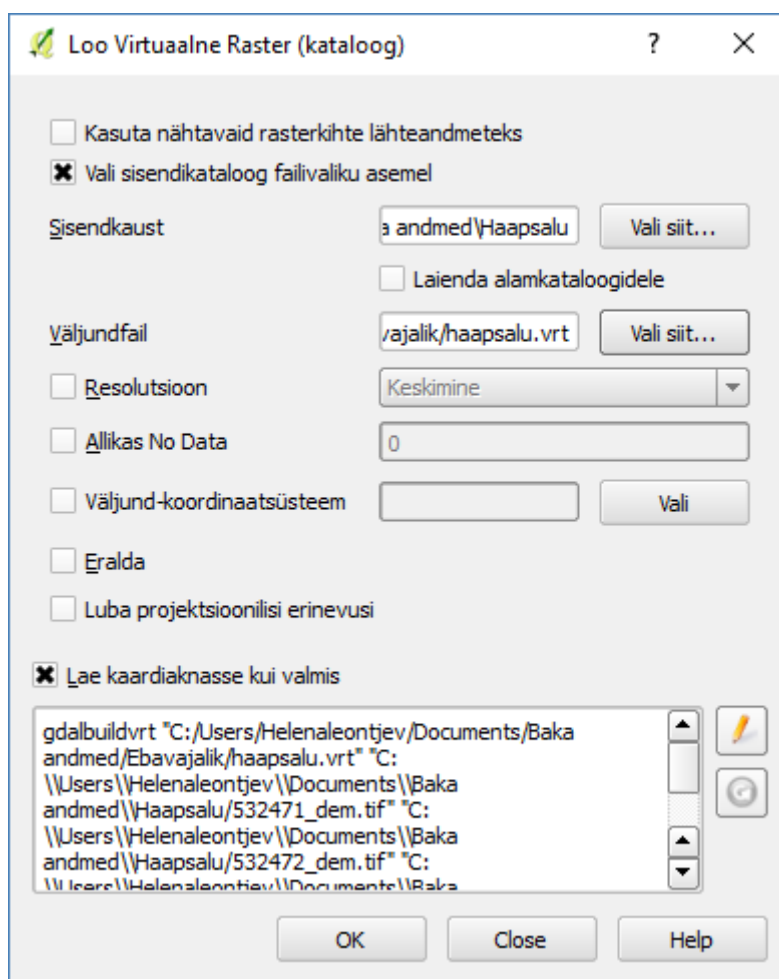
Käesoleva töö jaoks telliti GeoTiff failiformaadis ja 1-meetrise resolutsiooniga kõrgusmudelid viie (Haapsalu, Pärnu, Narva, Tallinn, Kuressaare) rannikuäärse piirkonna kohta (vt Joonis 4).

2.2. Metoodika ja andmetöötlus programmiga QGIS

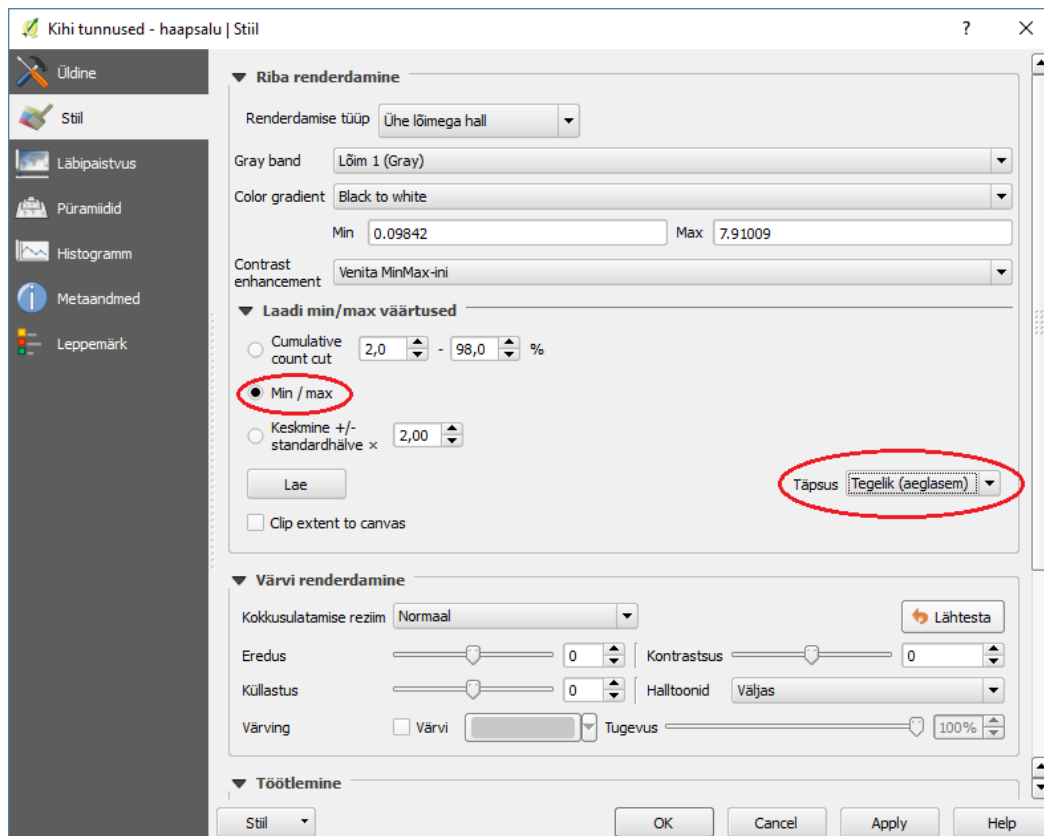
Tänapäeval on levinud GIS-l põhinev 3-D visualiseerimine, et modelleerida üleujutusi ja merevee taseme tõusu. Enamasti kasutataksegi just digitaalset kõrgusmudelit või digitaalset maastikumudelit 3-D visualiseerimiseks. Digitaalses kõrgusmudelis on kasutatud ruumilise eraldusvõime suurendamiseks erinevate valguste tuvastamist ja LIDAR-l põhinevat informatsiooni. Võimalikult suur eraldusvõime on vajalik selleks, et eristada üksteisest

üleujutuse kaardistamiseks vajalikud alad ning ülejäänud maapind. Käesolevas töös on samuti kasutatud andmetöötuse läbiviimiseks GIS tarkvara, et kaardistada üleujutusala kõrgusmudeli andmete põhjal. [20]

Andmetöötlus algas QGIS programmis virtuaalse rasteri loomisega (Joonis 5). Selleks tuli kõik ühe piirkonna kohta olemasolevad GeoTiff failid importida programmi ning luua nende põhjal raster fail. Loodud faili avamiseks tuli lisada rasterkiht. Avatud faili andmeväärtuste vahemikud polnud korrektsed. Toonide üleminek heledamalt tumedamale oli liiga järsk ning see tuli muuta sujuvamaks rasteri stiili alt, et rasteri toonid oleksid õigesti kuvatud (Joonis 6).

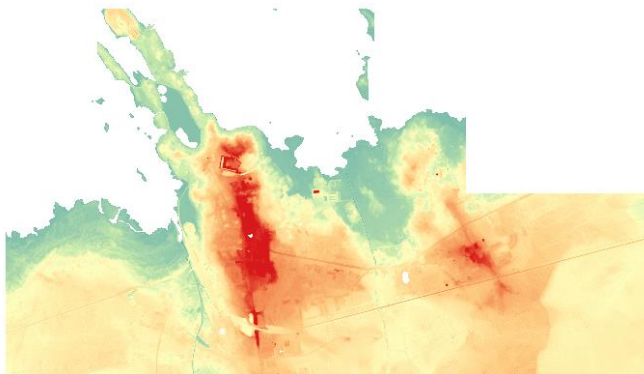


Joonis 5. Virtuaalse raster faili loomine programmis QGIS.



Joonis 6. Rastri stiili alt rastri faili toonide muutmine.

Järgmiseks etapiks oli loodud digitaalse kõrgusmodeli värviliseks muutmise (Joonis 7), mida sai teha stiili seadete alt. Kõrgusmodeli värvuseks tuli valida *Spectral* ning väärtuste vahemikud ja klasside arv võib ise valida sõltuvalt maastiku kõrguskasvust.



Joonis 7. Värviline digitaalne kõrgusmodel.

Koostatud kõrgusmodelitele tuli hakata lisama veetasemete kihte, kuid selle jaoks tuli esmalt arvutada igas linnas suhteline merevee taseme tõus. Suhtelise merevee taseme tõus leiti valemiga:

$$V_{\text{suh}} = V_{\text{glo}} - \text{MP}, \quad (1)$$

kus V_{glo} tähistab absoluutset globaalset maailmamere veetaseme tõusu kiirust 3,2 mm/aastas ning MP tähistab maapinna tõusu kiirust valitud linnas vastavalt maatõusu mudelitele Est2016LU [9] või NKG2016LU_abs [18]. Kahte erinevat maapinna tõusu mudelit on kasutatud, et näidata kui suured võivad tulla suhtelise merevee taseme tõusud erinevate andmete põhjal. Tabeli 1 tulbast 6 on näha, et kasutades absoluutset veetaseme ja maapinna tõusu kiirust, on suhteline veetaseme tõus Eestis praktiliselt olematu ning ka pikas perspektiivis (100 aastat) ei avalda see Eesti rannikualadele mõju. Kuna aegajalt eksitakse tahtlikult (et näidata veetaseme tõusu numbreid ja riski ülejutusladele suurematena kui nad on) või tahtmatult õige veetaseme ja maatõusu mudeli koos kasutamisega ning pannakse kokku absoluutne veetaseme tõus ja suhteline maapinna tõus, siis järgnevalt on siin töös just neid tulemusi (Tabel 1 tulp 5) illustreerimisel ja analüüsimisel kasutatud ning võrdluseks on juurde toodud absoluutmudelitel põhinevad andmed (Tabel 1 tulp 6).

Suhteline merevee taseme tõus erinevates Eesti piirkondades jääb vahemikku 0,1 – 3,0 mm/a (Tabel 1 tulp 5).

Tabel 1. Suhteline merevee taseme tõus Eestis erinevates piirkondades (mm/a)

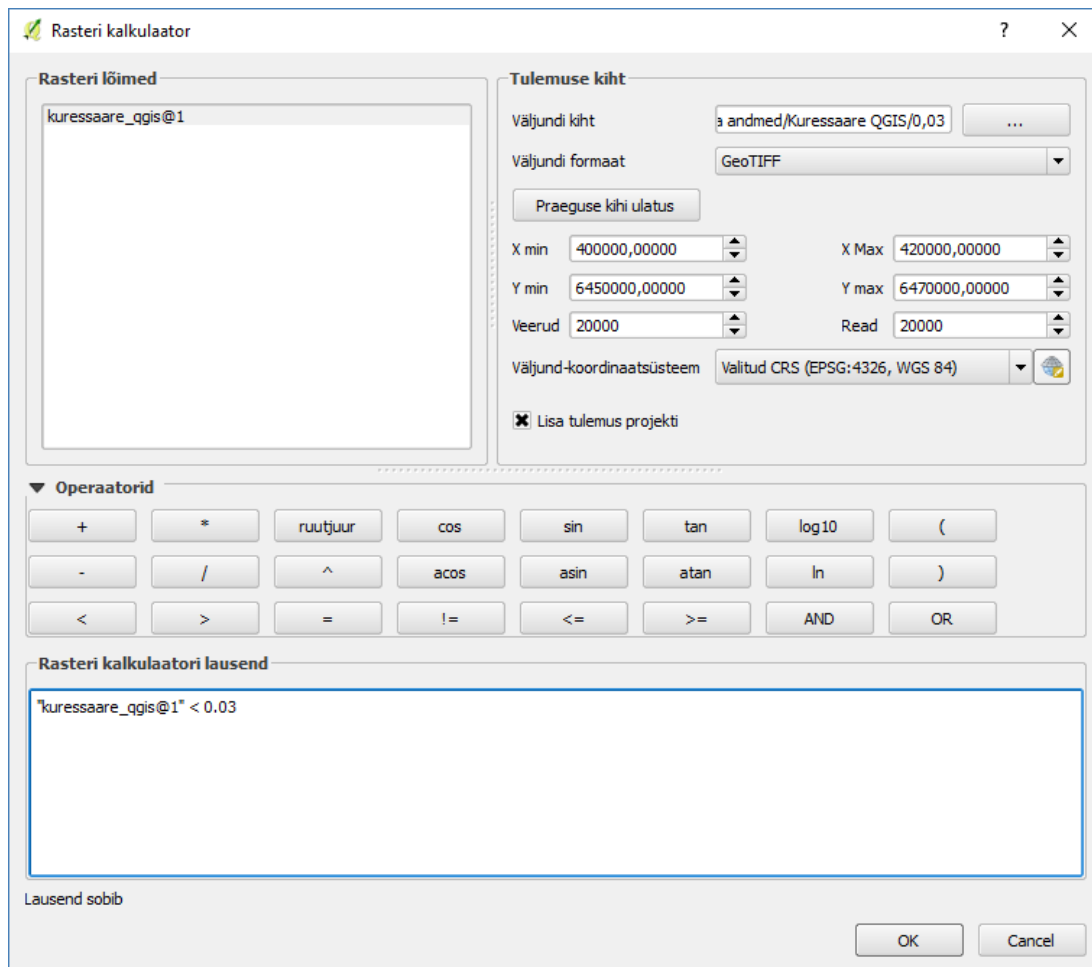
Piirkond	Merevee taseme tõus	Suhteline maapinna tõus mudeli Est2016LU põhjal	Absoluutne maapinna tõus mudeli NKG2016LU_abs põhjal	Suhteline merevee taseme tõus mudel Est2016LU põhjal (2-3)	Suhteline merevee taseme tõus mudel NKG2016LU_abs põhjal (2-4)
1	2	3	4	5	6
Haapsalu	3,2	1,2	3,1	2,0	0,1
Pärnu	3,2	0,2	2,0	3,0	1,2
Kuressaare	3,2	0,6	2,5	2,6	0,7
Tallinn	3,2	1,6	3,2	1,6	0,0
Narva	3,2	1,0	1,8	2,2	1,4

Tabelis 1 saadud suhtelist merevee taseme tõusu soovitakse prognoosida 10, 50 ja 100 aasta perspektiivis võrreldes hetkeseisuga ning vastavad tulemused on kantud Tabelisse 2.

Tabel 2. Suhteline merevee taseme tõus Eesti erinevates piirkondades 10, 50 ja 100 aasta pärast. Ühikud sentimeetrites

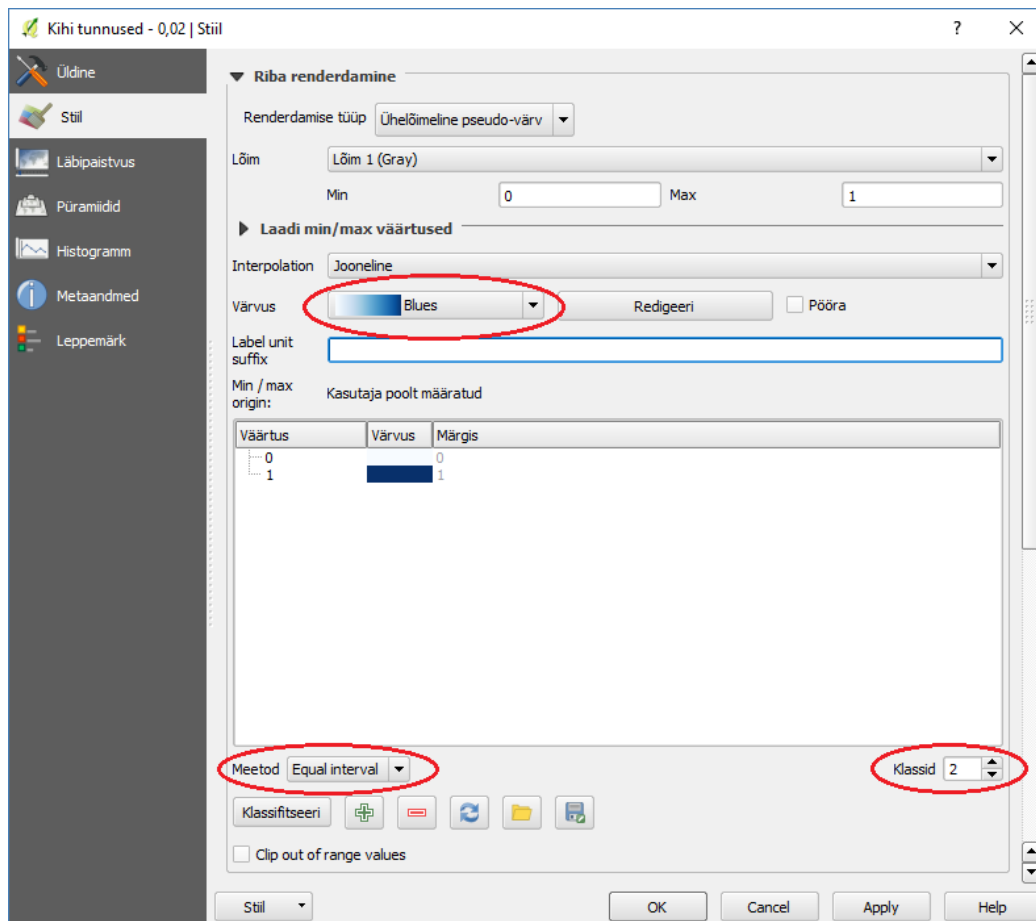
Piirkond	Suhteline merevee taseme tõus 10 aasta pärast		Suhteline merevee taseme tõus 50 aasta pärast		Suhteline merevee taseme tõus 100 aasta pärast	
	Est2016LU	NKG2016LU_ abs	Est2016LU	NKG2016LU_ abs	Est2016LU	NKG2016LU_ abs
Haapsalu	2,0	0,1	10,0	0,5	20,0	1,0
Pärnu	3,0	1,2	15,0	6,0	30,0	12,0
Kuressaare	3,0	0,7	13,0	3,5	26,0	7,0
Tallinn	2,0	0,0	8,0	0,0	16,0	0,0
Narva	2,0	1,4	11,0	7,0	22,0	14,0

Iga linna kohta saadud kolm suhtelist merevee taseme tõusu lisasin linna kõrgusmodelile. Erandina tootsin välja Tallinna, mille suhteline merevee taseme tõus on 0,0 mm/aastas kasutades maapinnatõusumudelit NKG2016LU_abs ning seetõttu selle kohta veetasemega kõrgusmodel puudub. Veetaseme tõuse sain lisada kasutades rastri kalkulaatorit (Joonis 8). Kalkulaatorisse tuli sisestada, et kõrgusmodel peab olema väiksem kui lisatud veetase.



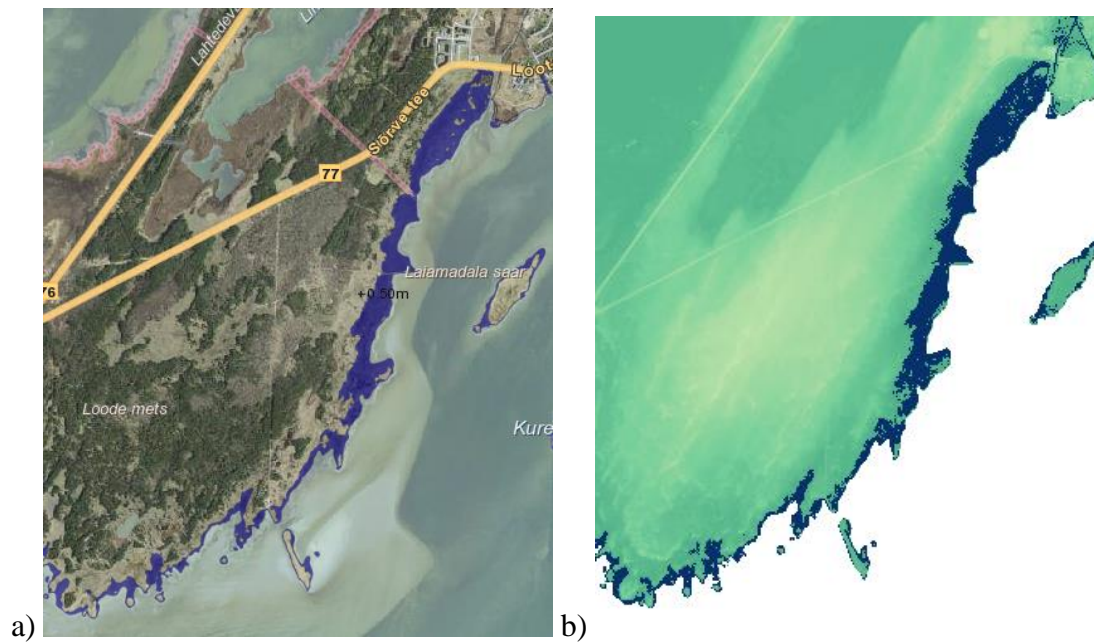
Joonis 8. Veetaseme lisamine kasutades rasteri kalkulaatorit.

Lisatud veetaseme seadeid tuli muuta stiili alt (Joonis 9). Värvuseks tuli panna *Blues* ning klasse pidi olema kaks. Viimase etapina lisasin kõrgusmudelile katastripiirid, et analüüsi juures oleks võimalik hinnata, kas ja millisele katastriüksusele tulevikus vesi võiks tungida. Selleks lisasin WMS kihi ja lõin ühenduse Maa-ametiga.



Joonis 9. Loodud veetaseme stiili muutmine.

Loodud kõrgusmodelitele lisatud veetaseme õigust sain kontrollida Maa-ameti abil. Maa-ameti kaardirakenduses on olemas ka üleujutusala kaart. Üleujutusala kaardil on võimalik veetaseme kõrgust valida vahemikus 0,50 – 3,00 meetrit. Selleks, et saaksin töö autori loodud kõrgusmodeli ja Maa-ameti kaardi üleujutusalasid omavahel võrrelda (Joonis 10) pidin lisama ka autori kõrgusmodelile 0,50 meetri kõrguse veetaseme.



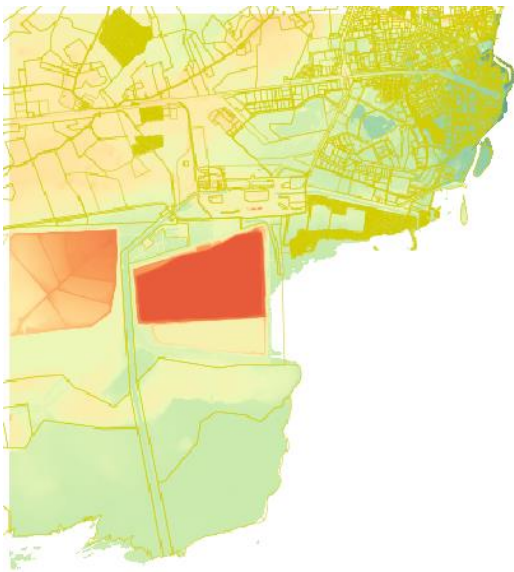
Joonis 10. 0,50-meetrise veetaseme tõusu korral üleujutusosalad a) Maa-ameti kaardil b) autori loodud kõrgusmodelil.

Jooniselt on näha, et üleujutusosalad on mõlemal mudelil samasugused. Seega võib öelda, et autori loodud kõrgusmodelile lisatud veetasemed on korrektsed ning usaldusväärsed edasise analüüsi tegemiseks.

3. TULEMUSED

3.1. Narva

Narva asub Narva veehoidla ja Narva jõe kaldal. Narva jõgi on Eesti kõige voolurohkeim jõgi, kuna on ainukene Peipsi järve väljavool. Suure vooluhulga tagajärjel võib koguneda Narva veehoidlasse jõe kaudu suur kogus vett, mis võib põhjustada üleujutusi. Narva jõel on olnud probleeme ka lobjakasulaga, mis kujutab endast jää- ja lumehunnikute kuhjumisel tekkivat jõe voolusärgi ummistust. Lobjakasula põhjustatud paisutuste korral on Narva jões veetaseme tõusnud ning tekitanud üleujutusi. [12]



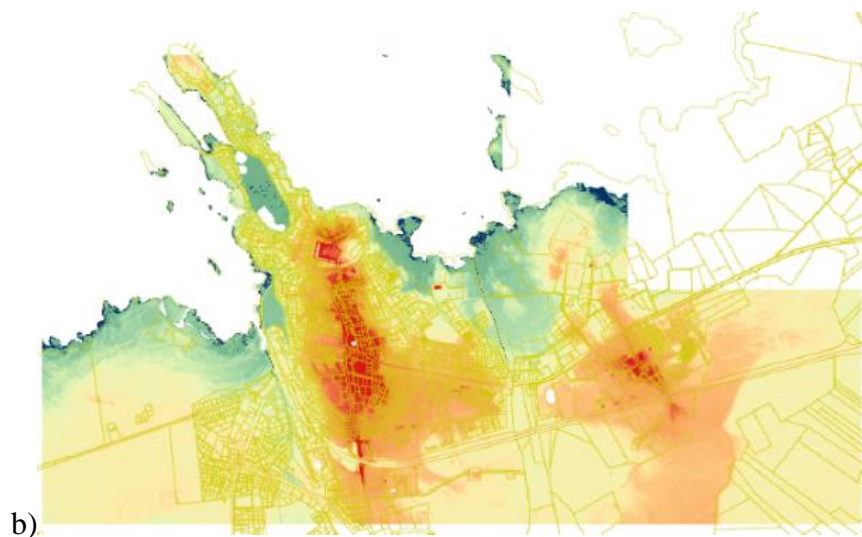
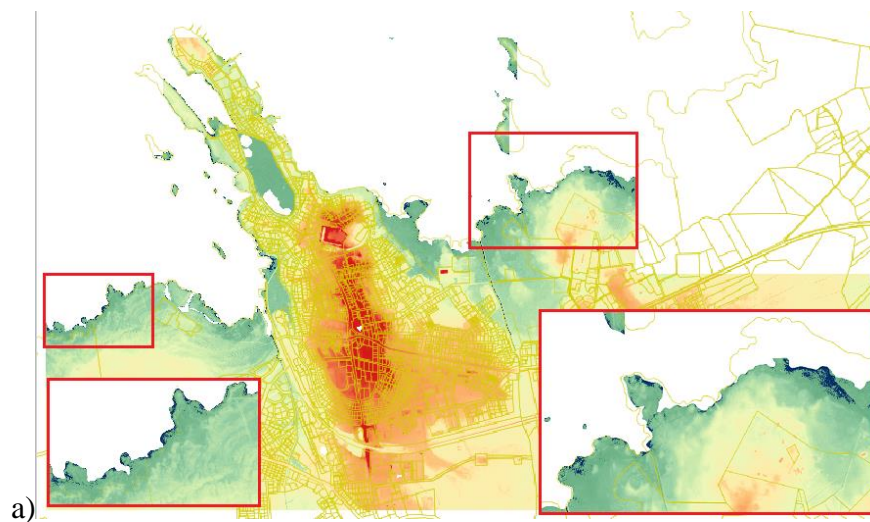
Joonis 11. 100 aasta pärast puuduvad üleujutusalaad Narvas.

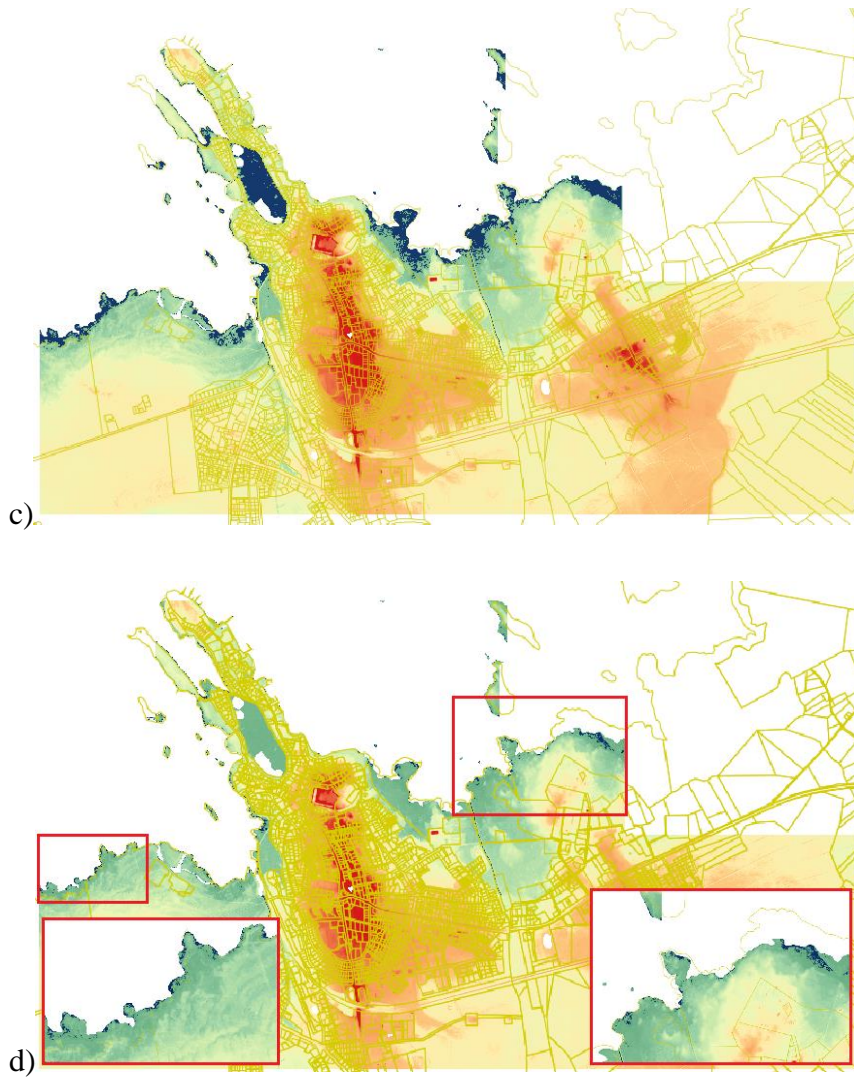
Kõrgusmudeli ja Est2016LU ning NKG2016LU_abs mudelite põhjal leitud suhteliste veetaseme tõusude põhjal (vt Tabel 2) võib öelda, et 100 aasta pärast Narvas üleujutused puuduvad (Joonis 11), kuna Narva linn jääb osaliselt Narva veehoidla kaldale, mille üheks eesmärgiks on ka veetaseme stabiilsena hoidmine. Ajutisi üleujutusi võib siiski ette tulla tugevate tormituulte korral, mis puhuvad ranna poole ning toovad endaga kaasa suure

veemassi. Suure veemassi tõttu veetase tõuseb ning tugev tormituul võib panna jões oleva vee lühikeseks ajaks isegi tagurpidi voolama, mille tagajärjel voolab vesi just Narvas suunas.

3.2. Haapsalu

Haapsalu on lauge ning lainetele avatud rannikuga linn Haapsalu lahe lõunakaldal. Haapsalu laht on mõjutatud Läänemere poolt. Tormiga läbi Taani väinade Läänemerre pressitud vesi (vt pt.1.2.) tõstab veetaset ning Läänemere veetaseme tõusuga kaasneb ka Haapsalu lahe veetaseme tõus. Haapsalu lahe veetaseme tõus ujutab kergesti üle madalad rannaäärsed alad, mida on varasemalt juba mitmeid kordi juhtunud.

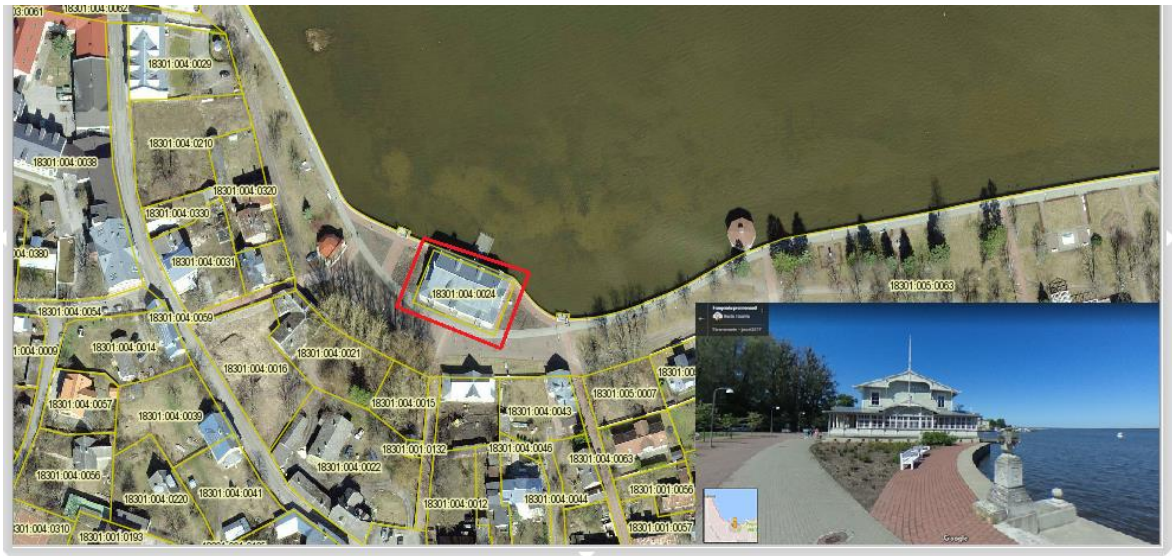




Joonis 12. Veetaseme tõusu mõju Haapsalus a) 10, b) 50 ja c) 100 aasta pärast mudeli Est2016LU põhjal ja d) 100 aasta pärast mudeli NKG2016LU_abs põhjal.

Suhtelist merevee taseme tõusu näitavate kõrgusmodelite põhjal (Joonis 12) võib öelda, et võttes aluseks mudeli Est2016LU on juba 10 aasta pärast näha Haapsalus üleujutusalasid. Mudeli NKG2016LU_abs põhjal on 100 aasta pärast üleujutused mõnevõrra väiksemad, kui eelnevalt nimetatud mudelil 10 aasta pärast, kuna veetaseme tõus on väiksem, kuid üldiselt jõuab vesi peaaegu kõikide samade katastriüksusteni, kuid katab veega väiksema ala. Mudeli Est2016LU alusel 10 aasta pärast ning mudelil NKG2016LU_abs alusel 100 aasta pärast hakkab vesi tungima kahele hoonega katastriüksusele 18301:004:0024 ja 18301:002:0420. Esimese puhul on tegemist ärihoonega (Joonis 13) ja teise puhul korterelamuga (Joonis 14). Mõlemad hooned on ehitatud veekogu äärde. Ülejäänud katastriüksused, millele vesi 10

aasta pärast või mudeli NKG2016LU_abs järgi 100 aasta pärast üleujutusalasid tekitab on tegemist madalate rannikuäärsete aladega.



Joonis 13. Katastriüksuse 18301:004:0024 ärihoone (Maa-amet ja Google Maps).



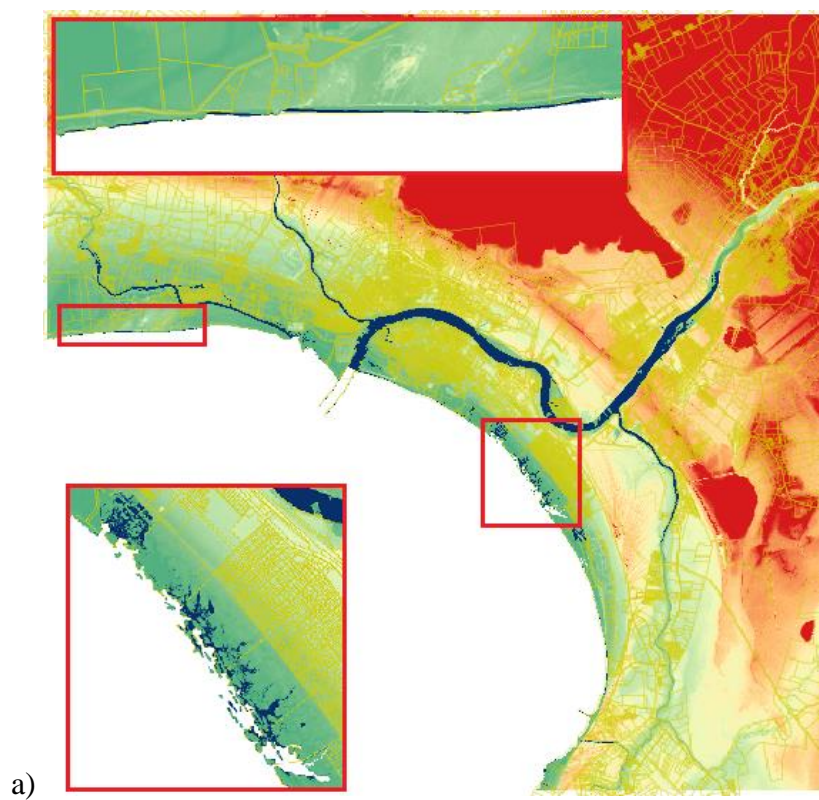
Joonis 14. Katastriüksuse 18301:002:0420 korterelamu (Maa-amet ja Google Maps).

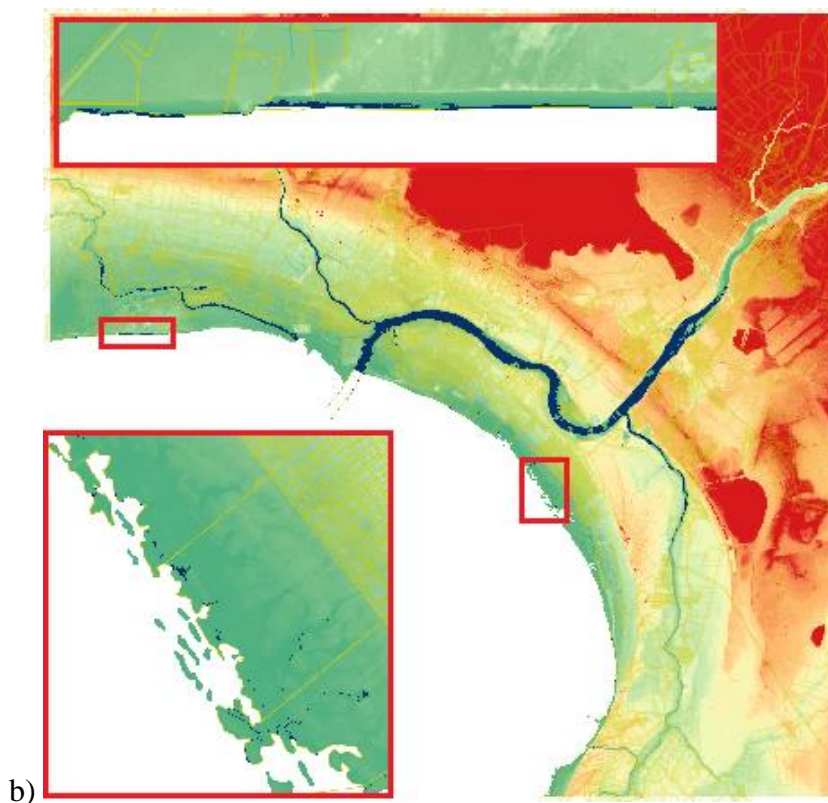
Nii 50 kui ka 100 aasta pärast on ainukesed hoonestusega katastriüksused eelnevalt nimetatud kinnistud, kus vesi jõuab osaliselt hooneteni. Mudeli Est2016LU järgi on peamised üleujutusalsad 100 aasta pärast madalatel rannikuäärsetel maatulundusmaadel ja

Järgneva 100 aasta jooksul tulev merevee taseme tõus ei põhjusta suur ohtu ühelegi elumajale, kuigi töös olevatest linnadest on kõige ulatuslikumad üleujutusalaad just Haapsalus. Suurem muutus mudeli Est2016LU põhjal, mida võib märgata peale 100 aastast veetaseme tõusu, et rannajoon hakkab oma kuju muutma, kuna ranniku madalad piirkonnad on üle ujutatud ning maismaa osa jääb järjest vähemaks. Samuti kaovad vee alla mandri lähedal olevad pisikesed saared. Hoolimata sellest, et kõrgusmudeli põhjal ei ohusta veetaseme tõus inimeste kodusid võib ette tulla siiski ootamatuid tormes, mis tõstavad veetaseme rohkem kui järgnevat 100 aastat ning tugeva tuule kaasmõjul ujutab vesi üle just rannaäärsed ehitised olgu need ärihooned või elumajad.

3.3. Pärnu

Nii nagu Haapsalu on ka Pärnu lauge ning lainetele avatud rannikuga linn. Pärnu asub Pärnu lahe kaldal ning linna läbib Pärnu jõgi, mis suubub lahte. Läbi aegade on kõige kõrgemad veetasemed olnud just Pärnus, mis on põhjustanud suuri üleujutusi. Kõrget veetaset on enamasti põhjustanud tormid, mida on soodustanud pikka aega puhuvad tugevad edelatuuled, mis kuhjavad Läänemerest lahte vett. Pärnu jõe veetaset on tõstnud ka lobjakasula, mille tagajärjel on üleujutusalasid just jõe ümbruses. [12]





Joonis 16. Veetaseme tõusu mõju Pärnus 100 aasta pärast mudeli a) Est2016LU ja b) NKG2016LU_abs põhjal.

Suhtelist merevee taseme tõusu kajastavatelt kõrgusmodelitelt (Joonis 16) on näha, et kasutades mudelit Est2016LU moodustavad umbes kolmveerandi kogu üleujutusaladest tegelikult hoopis jõed ning kasutades mudelit NKG2016LU_abs moodustavad jõed peaaegu terve üleujutusala. Mudeli Est2016LU alusel laienevad veetaseme tõusu korral kaks jõge, milleks on Sauga ja Audru, kuna Pärnu lahe veetaseme tõus tõstab veetaset ka jõgedes. Enamuse ülejäänud üleujutusala mudeliga Est2016LU moodustab madal rannikuäärne osaliselt juba praegu vesine ala (Joonis 17). Samuti kitseneb mõlema mudeli põhjal Pärnu liivarand, kuna vesi katab osa liivaga alast.

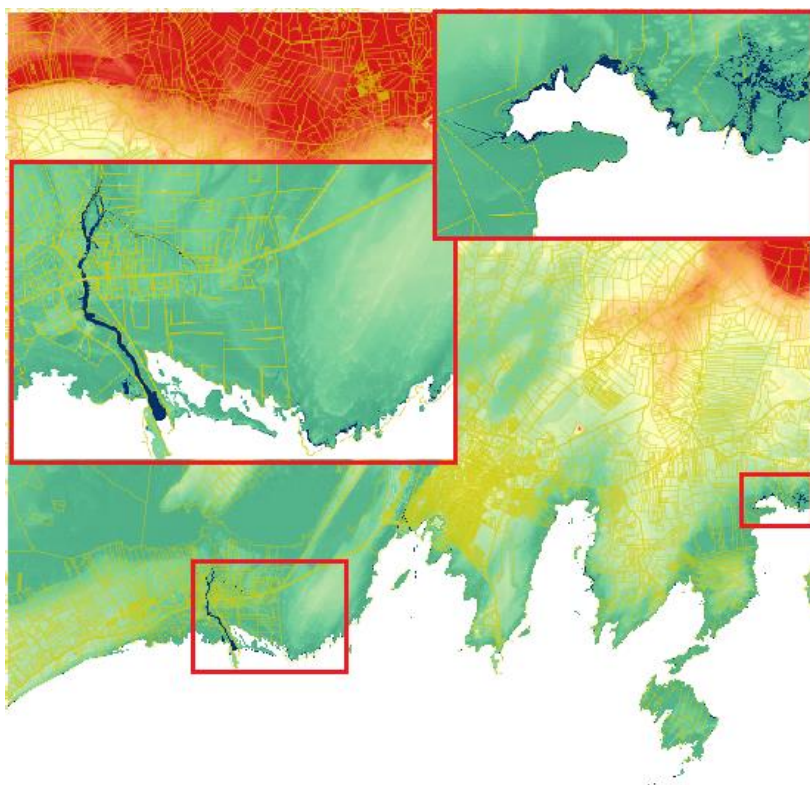


Joonis 17. Madal rannikuäärne üleujutusalaade piirkond.

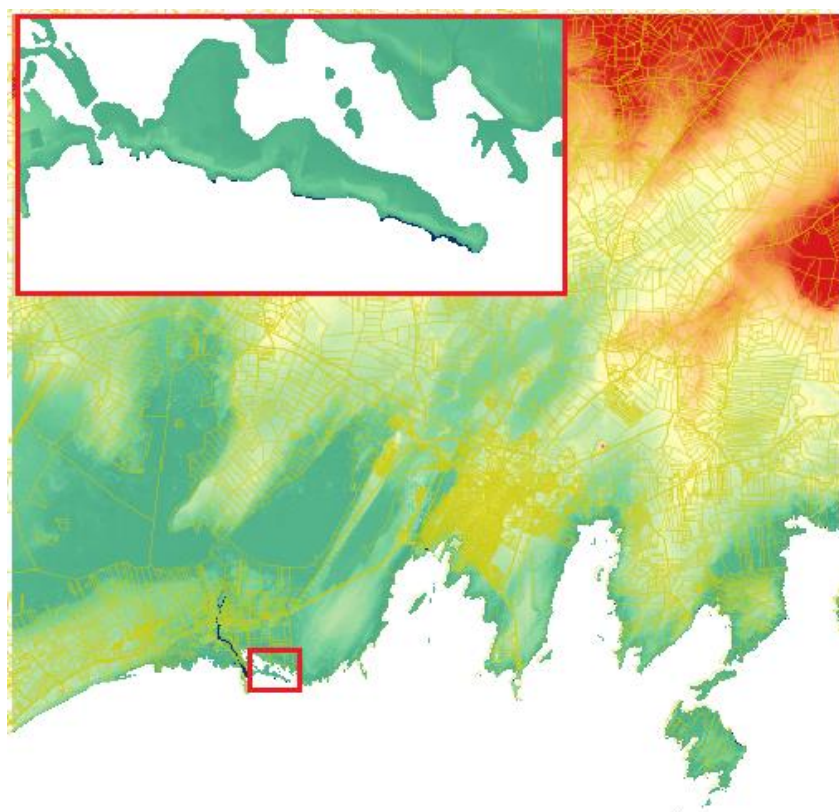
Mudeli Est2016LU põhjal leidub 100 aasta pärast väikseid üleujutusalasid maatulundusmaal, üldkasutataval maal, tootmismaal, riigikaitsemaal, elumumaal, ärimaal ja transpordimaal. Mudeli NKG2016LU_abs järgi on 100 aasta pärast üleujutusalad tunduvalt väiksemad ning praegu rannikuäärsed määrjad alad oluliselt ei laiene. Ühegi hooneni vesi siiski ei ulatu, kuid osaliselt kattuvad veega Pärnu jõe suudme juures olevad muulid mõlema mudeli järgi. Tormi ja tuulega võib siiski ette tulla suuremaid üleujutusi, kui kõrgusmodelitel näha on.

3.4. Kuressaare

Kuressaare on tasase rannakuäärne linn Saaremaal Kuressaare lahe põhjakaldal. Kuressaare laht on ühenduses Läänemerega ning suurte tormide ja tugevate läänekaarte tuulte korral tõuseb vesi Läänemeres ning põhjustab sellega veetaseme tõusu ka Kuressaare lahes ning üleujutusi linnas. Kuressaare on Eesti kõige läänepoolsem linn ning seega ka kõige lähemal Läänemerele, mille tõttu on saar kõige rohkem mõjutatud selle veetaseme tõusust.



a)



b)

Joonis 18. Veetaseme tõusu mõju Kuressaares 100 aasta pärast mudeli a) Est2016LU ja b) NKG2016LU_abs põhjal.

Kõrgusmodelitelt (Joonis 18) on näha, et ka 100 aasta pärast Kuressaares ning selle lähiümbruses peaaegu puuduvad üleujutusosalad. Umbes pool üleujutusosaladest moodustavad hoopis kinnistutel olevad kraavid ning kaks suuremat jõge Nasva ja Põdruse. Mudeli Est2016LU põhjal on 100 aasta pärast mõlemad jõed laienenenud, kuna veetaseme tõustes Suures katlas tõuseb vesi ka nendes jõgedes ning põhjustab kõrval olevatele kruntidele väikseid üleujutusalasid. Ülejäänud teise poole üleujutusosaladest moodustab madal rannikuala, mille näol on tegemist üldiselt maatulundusmaaga (Joonis 19).

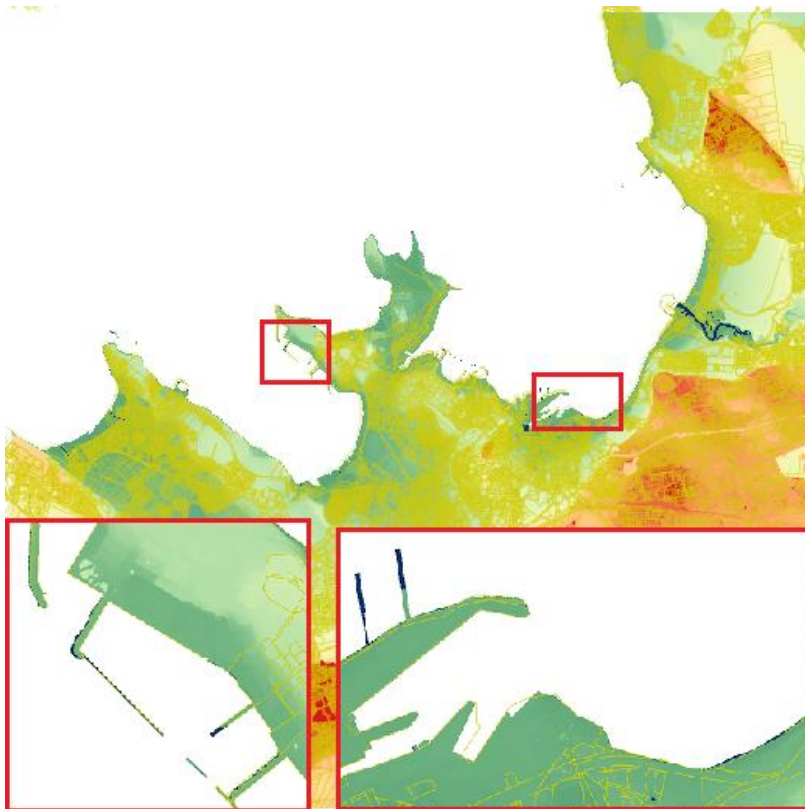


Joonis 19. Madalal rannikualal olevad üleujutusosalade piirkonnad (Maa-amet).

Mudeli Est2016LU põhjal on väikseid üleujutusi veel kaitsealusel maal, tootmismaal, ärimaal, elamumaal, transpordimaal ja üldkasutataval maal. Mudeli NKG2016LU_abs alusel jõuab vesi vaid mõne üksiku katastriüksuseni ning üleujutusosalad on peaaegu olematud. Ühegi hooneni 100 aasta pärast vesi ei ulatu ning enamuse rannäärsetel elamumaadel hetkel hooned puuduvad. Mudeli Est2016LU järgi väheneb mõnevõrra Kuressaare liivaranna osa, kuna veepiir liigub rohkem sisemaa poole. Nii nagu kõikides teistes linnades võib ka Kuressaares ajutisi üleujutusi põhjustada ettearvamatu torm koos tugevate tuultega ja Läänemere veetaseme tõus.

3.5. Tallinn

Tallinn on linn Tallinna lahe kaldal, mis on Soome lahe siselaht. Tugevad loode- ja läänetuuled kuhjavad Soome lahest vett Tallinna lahte ning tõstavad selle veetaset, mille tagajärjel võib olla Tallinnas üleujutusi. Viimasel ajal Tallinnas aset leidnud ajutised üleujutused on põhjustatud peamiselt paduvihmast, kuna vesi ei suuda nii kiiresti kanalisatsiooni kaudu ära voolata, kui kiiresti seda juurde sajab.



Joonis 20. Veetaseme tõusu mõju Tallinnas 100 aasta pärast.

Suhtelist merevee taseme tõusu näitava kõrgusmudeli põhjal (Joonis 20) võib öelda, et 100 aasta pärast on kõige väiksemad üleujutusosalad just Tallinnas võrreldes töös olevate linnadega, kus on üleujutusosalad olemas. Kõrgusmudelilt on näha, et enamus üleujutusosalade puhul on tegemist Pirita jõe ja ojadega. Nimetatud jõge ja ojasi ei mõjuta järgneva 100 aasta jooksul toimuv veetaseme tõus ning nad ei hakka vett üle ajama. Samuti võib mudelilt märgata, et üksikud pisikesed üleujutusosalad oleksid justkui sisemaal, kuid tegelikult on

nendes kohtades kas tiigid või on kõrgusandmeid mõõdistades nendes kohtades olnud maapinnast sügavam auk (Joonis 21)



Joonis 21. Sisemaal olevad üleujutusalaad (Maa-amet ja Google Maps).

Juba 10 aasta pärast võib märgata üleujutusi sadama kaidel ning 100 aasta pärast on nt Vanasadama üks kai täielikult vee all. Ülejäänud rajatistele ja hoonetele järgneva 100 aasta jooksul veetaseme tõus ohtu ei põhjusta, kuna vesi ei ulatu nendeni. Üksikuid üleujutusalasid on elumaal, ärimaal, tootmismaal, sotsiaalmaal, maatulundusmaal, üldkasutataval maal, transpordimaal ja ühiskondlike ehitiste maal. Suhteline merevee taseme tõus Tallinnat ei ohusta järgneva 100 aasta jooksul, küll aga tasub Tallinnal karta tulevikus äikesetorme koos tugeva paduvihmaga, mis ujutavad üle tänavad ja kaubanduskeskused, kuna hooned on ehitatud nii üksteise kõrvale, et veel pole ruumi tänavatelt ära voolata.

KOKKUVÕTE

Tänapäeval suureks probleemiks olev globaalne kliima soojenemine on põhjustanud Gröönimaa ja Antarktika liustike sulamise. Nende sulamise tagajärjel tõuseb maailmamere veetase ning see võib endaga kaasa tuua üleujutused rannikualadel ning madalamates piirkondades. Üleujutuste modelleerimiseks saab kasutada digitaalset kõrgusmodelit (DEM).

Uurimistöö eesmärgiks on hinnata erinevatest maatõusumudelitest (Est2016LU ja NKG2016LU_abs) pärinevate maatõusu kiiruste mõju suhtelise mereveetaseme tõusu arvutamisel ning kaardistada rannikuäärsete linnade (Haapsalu, Tallinn, Pärnu, Narva ja Kuressaare) üleujutusala 100 aasta pärast.

Käesolevas töös viidi andmetöötlus läbi Quantum GIS programmis ning andmetöötluse alusmaterjalideks olid Maa-ametist tellitud kõrgusmodelid. Töödeldud kõrgusmodelitele lisati kolm erineva kõrgusega veetaset vastavalt arvutatud suhtelisele merevee taseme tõusule. Suhteline merevee taseme tõus arvutati autori koostatud valemi järgi ning tulemuseks saadi, et kõige suurem merevee taseme tõusu kiirus on Pärnus ning kõige väiksem on Tallinnas.

Mõlema mudeli põhjal koostatud kõrgusmodelitelt on näha, et järgneva 100 aasta pärast puuduvad üleujutusala Narvas ning mudeli NKG2016LU_abs järgi puuduvad üleujutusala 100 aasta pärast ka Tallinnas. Kõige ulatuslikumad üleujutusala on Haapsalus, kus ainukesena vesi jõuab ka osaliselt kahe hooneni, mis on ehitatud veekogu äärde. Samuti võib märgata, et 100 aasta pärast hakkab Haapsalu rannajoon kuju muutma, kuna mudeli Est2016LU alusel katab vesi märgatava osa praegusest madalast rannikuäärsest alast ning lisaks kattuvad veega mitmed Haapsalu lähedal olevad pisikesed laiud.

Mudeli Est2016LU põhjal on nii Pärnus, Tallinnas kui ka Kuressaares üleujutusala 100 aasta pärast siiski küllaltki väikesed ning ühegi hooneni vesi ei ulatu. Rajatistest ujutab vesi osaliselt üle Tallinnas sadama kaid ning Pärnus muulid. Haapsalus, Pärnus ja Kuressaares kitseneb liivaranna osa, kuna veepiir liigub järgneva 100 aasta jooksul järjest enam sisemaa

poole. Ülejäänud üleujutusosalad on üldiselt madalad rannaäärsed piirkonnad, mille puhul on tegemist maatulundusmaaga või üldkasutatava maaga.

Töö tulemustest järeldub, et kui ka tahtlikult valida suhtelise veetaseme tõusu interpreteerimiseks vale maatõusu mudel, siis globaalsest veetaseme tõusust tingitud üleujutusi järgneva 100 aasta jooksul valitud Eesti linnades ees ootamas pole. Samas pole ükski valitud linnadest kindlustatud ootamatute üleujutuste eest, mida põhjustavad enamasti tormid. Tormide ajal pikka aega puhuvad läänekaarte tuuled suruvad vett läbi Taani väinade Läänemerre ning põhjustavad sellega veetaseme tõusu ja üleujutusi Eesti rannikul. Seega tuleb alati arvestada ka ajutiste üleujutustega, hoolimata sellest, et stabiilse veetaseme tõusu korral suured üleujutusosalad puuduvad.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Aviso. Altimetry. [veebileht]
<https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry.html> (15.07.2017)
2. European Environment Agency. (2014). Global and European sea-level rise. [veebileht]
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/sea-level-rise-3/assessment> (22.03.2018)
3. European Environment Agency. (2017). Global and European sea level. [veebileht]
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/sea-level-rise-5/assessment> (22.03.2018)
4. Geoportaal. (2018). Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. [veebileht]
<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html> (02.05.2018)
5. Geoportaal. (2018). Kõrgusmudelid. [veebileht]
<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Korgusmudelid-p508.html> (02.05.2018)
6. **Heritage, G. L., Large, A. R. G.** (2009). Laser scanning for the environmental sciences. Chichester: Wiley-Blackwell. 278 p.
7. **Hünicke, B., Zorita, E., Soomere, T., Madsen, K. S., Johansson, M., Suursaar, Ü.** (2015). Recent Change – Sea Level and Wind Waves. Springer Link.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16006-1_9#Sec1
8. **Kall, T.** (2008). Maapinna vertikaallikumiste uurimisest Eestis ja Fennoskandias.- *Geodeet*. Nr. 36. [e-ajakiri]
<http://egu.ee.mic2.mikare.ee/uploads/userfiles/file/geodeet/geo36-kall.pdf> (02.04.2018)
9. **Kall, T.** 2016. Vertical crustal movements based on precise levellings in Estonia. Doktoritöö. Eesti Maaülikool metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 236 lk.
10. **Kartau, R.** 2015. Interpoleerimismeetodite sobivuse hindamine kõrgusmudeli loomisel. Magistritöö. Eesti Maaülikool Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu. 84 lk.
11. **Kirsimäe, P.** (2010). LIDAR andmetest. Maa-amet.
http://www.nlib.ee/html/yritus/gis/2010/docs/13.20_Kirsimae.pdf (02.05.2018)
12. **Klaus, L., Kovalenko, O., Vahter, I.** (2012). Üleujutus. Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut.
http://www.ilmateenistus.ee/wpcontent/uploads/2013/01/eesti_ilma_riskid_2012_uleujutus.pdf (16.10.2017)
13. **Kullas, T., Suursaar, Ü.** Meretase ja hoovused Eesti rannikumeres muutuva kliima tingimustes. Tallinn: Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut.

- <https://drive.google.com/file/d/0BzMtAfmqvqBrOGMwYWEyNjgtZmQ3Yy00ZTBmLWEwZjQtY2E4NDM1YmYwNTUz/view> (15.07.2017)
14. **Lindsey, R.** (2017). Climate Change: Global Sea Level. National Oceanic and Atmospheric Administration. [veebileht]
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level> (06.01.2018)
 15. **Metsur, M.** (2012). LIDAR Leica ASL50-II. Geoportaal.
http://geoportaal.maaamet.ee/docs/2012_LIDAR.pdf (17.10.2017)
 16. **Sweet, W., Horton, R., Kopp, R., Romanou, A.** (2017). Sea level rise. University of Nebraska – Lincoln. Publication, Agencies and Staff of the U.S. Department of Commerce. USA.
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1582&context=usdeptcommercepub> (01.04.2018)
 17. Täna ajaloos 2.11: Eestit räsib kõigi aegade tugevaim torm. (2017). – *Heureka Postimees*. [e-ajaleht]
<https://heureka.postimees.ee/4296321/tana-ajaloos-2-11-eestit-rasis-koigi-aegade-tugevaim-torm> (03.05.2018)
 18. **Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H., Lidberg, M., Oja, T., Rüdja, A., Saaranen, V., Jepsen, C., Liepins, I., Paršeliūnas, E., Tarasov, L.** (2016). NKG2016LU, an improved postglacial land uplift model over the Nordic-Baltic region. Nordic Geodetic Commission (NKG) Working Group of Geoid and Height Systems.
http://wpstatic.idium.no/geoforum.no/2017/11/15_Ny-landhevingsmodell.pdf (20.05.2018)
 19. Vikipeedia. (2017). DEM-kõrgusmudel. [veebileht]
<https://et.wikipedia.org/wiki/DEM-k%C3%B5rgusmudel> (15.07.2017)
 20. **Yang, B.** (2016). GIS based 3-D landscape visualization for promoting citizen's awareness of coastal hazard scenarios in flood prone tourism towns. – *Volume*. Nr. 76. [e-ajakiri]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622816304180> (15.07.2017)

LISAD

Lisa 1. Maa-ametist ruumiandmete kasutamiseõiguse saamise taotlus

TAOTLUS ruumiandmete kasutusõiguse saamiseks

Esitamise kuupäev **20. aprill. 2018**

1. Taotleja andmed ning andmete kasutamise eesmärk

Nimi ja kood:	Helena Leontjev (49510282734) asutuse nimi ja registrikood või füüsilise isiku nimi ja isikukood		
Postiaadress:	tänav, maja number Tuuliku 2-4	linn, vald Tabivere, Tartu vald, Tartumaa	sihtnumber 49127
Kontaktisik:	Helena Leontjev	Amet:	Üliõpilane, Eesti Maaülikool, Geomaatika osakond
Telefon:	+372 59068283	E-post:	helena.leontjev@gmail.com
Taotlus siduda lepinguga nr:		Andmete kasutamise eesmärk:	Ülikoolis tehtava uurimistöö jaoks, mille pealkiri on: Kõrgusmodeli andmete põhjal ülevajutusala kaardistamine Haapsalus, Tallinnas, Pärnus, Narvas, Kuressaares, Pärissaates.

2. Taotletavad ruumiandmed

Nimetus	Formaat <i>märkida nimetuse ette kasti sisse ristikesega (x)</i> <i>(vajadusel tutvuda näidisandmetega)</i>	Andmete ulatus lehtede numbrid, haldusüksuse nimed, kogu Eesti, pindobjektid kaasa lisatavas graafikafailis
Eesti topograafia andmekogu (ETAK) ruumiandmed andmebaasi hetkeseisuga (ei sisalda kohanimesid ja reljeefi)	ESRI GDB Mapinfo TAB (ei sisalda WOR faili ega kujundust)	ESRI Shape (SHP)
Eesti põhikaart 1:10 000 (ETAK andmete alusel)	Värviline GeoTIFF	Mustvalge GeoTIFF
Eesti topograafia andmekogu (ETAK) ruumiandmed Eesti põhikaardi 1:10 000 seisuga (lisaks kohanimesid ja reljeefi)	ESRI GDB Mapinfo TAB	ESRI Shape (SHP) Bentley DGN v8
Eesti põhikaart 1:20 000	GeoTIFF	
Eesti topograafilised ruumiandmed 1:50 000	ESRI GDB	ESRI Shape (SHP)
Ortofoto (GSD 25-50 cm) 1:10 000 lehtede jaotuse järgi	RGB ECW	RGB GeoTIFF
	CIR ECW	CIR GeoTIFF
	3D RGB ECW	3D RGB GeoTIFF
	NGR ECW	NGR GeoTIFF
Ortofoto (GSD 25-50 cm) 1:2 000 jaotuse järgi	RGB GeoTIFF	
Ortofoto (GSD 10-16 cm) üksikute tiheasulate kohal, asulate välispiiril olevad lehed võivad olla andmetega kaetud osalises ulatuses; 1:2 000 lehtede jaotuse järgi	RGB ECW	RGB GeoTIFF
	CIR ECW	CIR GeoTIFF
	3D RGB ECW	3D RGB GeoTIFF
LIDAR kõrguspunktid	XYZ (ASCII TXT)	LAS
LIDAR kõrguspunktid (madallend) (üksikute tiheasulate kohal, asulate välispiiril olevad lehed võivad olla andmetega kaetud osalises ulatuses)	XYZ (ASCII TXT)	LAS
Kõrgusmodel (DTM)	GeoTIF F	5m 10m 25m 50m 100m
	XYZ	5m 10m 25m 50m 100m

Kõrgusmudel (DTM) tiheasulate madallendude põhjal	GeoTIF F	X	1m								Kaardilehe nr. 63.93, 63.94, 63.83, 63.84 Tallinna piirkond Kaardilehe nr. 53.72, 53.73, 53.62, 53.63 Pärnu piirkond Kaardilehe nr. 65.83 Narva piirkond Kaardilehe nr. 52.50, 52.51, 52.60, 52.61 Kuressaare piirkond Kaardilehe nr. 62.37 Haapsalu piirkond	
	XYZ		1m									
Kõrguskaart (värviline)	GeoTIF F		1m		10 m		25 m		50 m		100m	
Kõrguskaart (halltoonides)	GeoTIF F		1m		10 m		25 m		50 m		100m	
Maakatte kõrgusmudel (DSM) absoluutkõrgusega merepinnast	GeoTIF F		1m		5m							
Maakatte kõrgusmudel (nDSM) ilma maapinnata / maapind nullkõrgusega	GeoTIF F		1m		5m							
Taimkatte kõrgusmudel (CHM)	GeoTIF F		10m									

Lisamärkused / kasutatav tarkvara (ei ole kohustuslik, kuid võimaldab hinnata, kas olete andmed taotlenud sobivaimas failiformaadis): Juhul kui 1 meetriseid andmeid selle piirkonna kohta ei ole, siis piisab ka 5 meetri andmetest. Kaardilehtede numbrid on esitatud 1:20000.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Helena Leontjev,
(sünnipäev pp/kuu/aa 28.10.1995)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Eesti rannikuäärsete linnade üleujutusala kaardistamine kõrgusmudeli andmete põhjal, mille juhendaja on Aive Liibusk,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 24.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)